МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.822.178 10.23947/1992-5980-2017-17-1-28-34

Узел трения-скольжения головки шатуна плунжерного насоса высокого давления с применением самосмазывающегося подшипника из порошкового антифрикционного материала*

М. В. Корчагина[1], С. О. Киреев[2], С. Л. Никишенко[3], А. Д. Кузин[4] **
[1,2,3,4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Sliding friction unit of connecting-rod end of high-lift plunger pump using self-lubricated bearing from powder antifriction material***

M. V. Korchagina[1], S. O. Kireev[2] , S. L. Nikishenko[3], A. D. Kuzin[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассматриваются порошковые антифрикционные материалы, применяемые в нефтегазовой промышленности. Особое внимание уделено материалам, обладающим эффектом самосмазываемости. Предлагается применение такого материала в узле трения одного из наиболее распространенных видов оборудования сервиса нефтегазовых скважин — плунжерном насосе высокого давления. Приводится конструктивная схема насоса с описанием модернизируемого узла, рассматриваются проблемы, возникающие при изготовлении и эксплуатации подшипниковой группы малой головки шатуна.
Материалы и методы. С учетом опыта применения в машиностроении вкладышей подшипников из порошковых антифрикционных материалов подобран железографитовый пористый материал. Произведено изменение конструкции, учитывающее особенности работы самосмазывающихся материалов, позволяющее наиболее полно использовать их свойства. Рассматривается один из важнейших параметров работы подшипника скольжения — зазор между втулкой и валом. Подобрана посадка, обеспечивающая наибольшее прилегание втулки к валу по всей поверхности, что улучшает теплоотвод, способствует равномерному распределению нагрузки по поверхности трения и, тем самым, повышает работоспособность подшипникового узла.
Результаты исследования. Предложен вариант изменения конструкции узла трения малой головки шатуна приводной части насоса с использованием самосмазывающегося подшипника из порошкового антифрикционного материала на основе железа. Предложенный подшипник удовлетворяет условиям нагружения рассматриваемого узла. Конструкция разработана с учетом условия самосмазываемости, что позволяет упростить изготовление шатуна, исключив необходи-

Introduction. The powder antifriction materials applied in the oil and gas industry are considered. Special attention is given to the materials with the effect of self-lubricity. The use of such materials in a frictional unit of one of the most widespread types of the oil and gas well service equipment – a high-lift plunger pump – is offered. The pump construction diagram with the description of the modernized unit is provided; the problems arising under the production and exploitation of the connecting-rod pin bearing group are described.
Materials and Methods. Upon the experience in applying bearing bushes from powder antifriction materials in mechanical engineering, the iron graphite porous material is selected. The design change considering the self-lubricating materials behavior and allowing the best usage of their properties is made. The bushing-to-shaft gap, one of the most important parameters of the plain bearer performance, is considered. The fit providing the fullest seating of the bushing to the shaft is selected. That improves the heat removal, promotes the even load distribution over the frictional area, and so enhances the operating capacity of the bearing unit.
Research Results. A change option of the frictional unit design of a connecting-rod small power end with the use of the self-lubricated bearing from the powder antifriction iron-based material is offered. The proposed bearing meets the loading conditions of the considered unit. The design is developed due to the condition of self-lubricity that allows simplifying the production of a connecting rod obviating the manufacturing of oilholes in the connecting rod body. The analysis of the offered modernization is carried out with the application of 3D modeling. The constructed models

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ms.korchaginamv@mail.ru, kireevso@yandex.ru, nikish1947@mail.ru, Kuzin_lesha@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

мость изготовления смазочных отверстий в теле шатуна. Анализ предлагаемой модернизации проводится с применением 3D моделирования. Построенные модели позволяют наглядно оценить упрощение всей конструкции шатуна, изготовления входящих в него деталей, а также его сборки.
Обсуждение и заключения. Полученные модели позволяют сделать вывод о целесообразности изменения конструкции подшипника для узла трения-скольжения малой головки шатуна плунжерного насоса высокого давления с учетом использования порошкового антифрикционного материала взамен существующего. Применение такого подшипника с эффектом самосмазывания позволит значительно упростить конструкцию шатунного узла.

permit to visually estimate the simplification of the entire connecting rod design, the production of its constituent parts, as well as its assembling.
Discussion and Conclusions. The obtained models allow drawing a conclusion on the feasibility of the bearing design change for the sliding friction unit of the connecting-rod end of the high-lift plunger pump using the powder antifriction material to replace the existing one. The application of this bearing with the effect of self-lubricity will allow a substantial simplification of the pin bearing unit design.

Ключевые слова: плунжерные насосы высокого давления, порошковые антифрикционные материалы, самосмазывающиеся подшипники, смазка, трение, износ.

Keywords: high-lift plunger pumps, powder antifriction materials, self-lubricated bearings, lubrication, friction, wear.

Введение. Антифрикционные спеченные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии, получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, в том числе в нефтегазовом машиностроении [1]. Одно из основных их преимуществ — обеспечение эффекта самосмазываемости, т.е. сохранение слоя смазки на поверхности за счет смазки, находящейся в порах материала, что предохраняет материал подшипника от катастрофического износа и схватывания, а, следовательно, исключает возможный выход из строя подшипника в момент аварийного прекращения подачи смазки, который возможен при использовании обычных подшипников. В составе антифрикционных порошковых материалов содержатся вещества, выполняющие роль смазки (графит, сульфиды и т.д.), а также масло в порах, которые обеспечивают получение низкого коэффициента трения и малого износа в условиях ограниченной смазки. Спеченные антифрикционные материалы могут заменить дорогостоящие подшипниковые сплавы. Они сокращают расход металла и снижают затраты за счет использования более прогрессивной технологии, позволяющей исключить механическую обработку.

В узлах и механизмах оборудования нефтегазовой промышленности детали из порошковых антифрикционных материалов используются в качестве различного рода втулок, подшипников скольжения, торцевых уплотнений и т.д. [1].

Широко распространённым оборудованием в нефтегазовой промышленности являются плунжерные насосы высокого давления. Такие насосы входят в состав специализированных мобильных комплексов при проведении цементирования и кислотной обработки скважин, гидравлического разрыва пластов, гидропескоструйной перфорации, глушения скважин и других тампонажных работ. В качестве типичного представителя плунжерных насосов высокого давления сервиса нефтегазовых скважин выберем конструкцию насоса НП-720 компании ЗАО «Траст-Инжиниринг», как в наибольшей степени отвечающую современным требованиям, предъявляемым к нефтегазопромысловому оборудованию подобного рода, не уступающую конструкциям лучших мировых образцов насосов подобного типа [2].

Приводная часть насоса представляет собой сварную неразъемную станину, в которой смонтированы три продольно расположенные шатунно-крейцкопфные группы и поперечно установленный коренной кривошипный вал с тремя эксцентрично расположенными шейками (рис. 1).

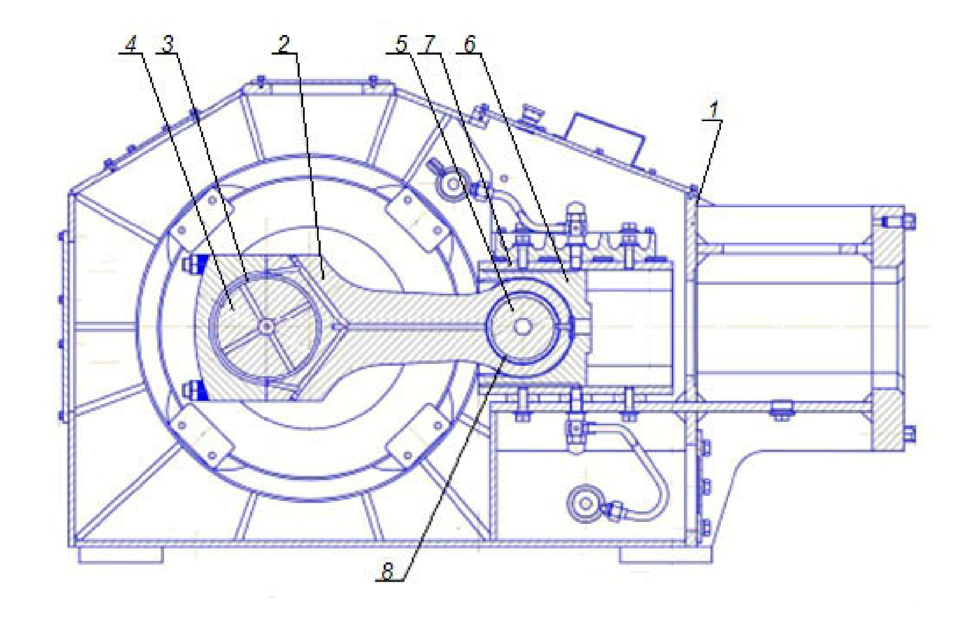


Рис. 1. Основные элементы конструкции шатунно-крейцкопфного механизма привода плунжерного насоса высокого давления: 1 — корпус приводной части насоса; 2 — шатун; 3 — вкладыш; 4 — вал кривошипный; 5 — палец шатуна; 6 — крейцкопф; 7 — направляющие; 8 — втулка

Fig. 1. Basic structural elements of connecting-rod crosshead driving gear of high-lift plunger pump: 1 – power end body; 2 – piston-rod; 3 - bush; 4 - crank shaft; 5 - connecting-rod pin; 6 - crosshead; 7 - guides; 8 – bush bearing

Шатунно-крейцкопфные группы включают стальные кованые крейцкопфы и шатуны, в малые головки которых запрессованы антифрикционные втулки с бронзовой заливкой, охватывающие пальцы крейцкопфов. В больших головках шатунов размещены антифрикционные полувкладыши разъемных подшипников скольжения, охватывающие шейки кривошипов коленчатого вала. Большие головки шатунов соединены с крышками болтами-стяжками.

В настоящей конструкции все подшипники работают в условиях смазки. Система смазки насоса обеспечивает принудительную раздельную смазку подвижных узлов приводной и гидравлической частей насоса. По оси кривошипа коренного вала имеются отверстия для подвода по радиальным каналам смазки на трущиеся поверхности больших шеек кривошипов. Рассматриваемый узел находится в достаточно труднодоступном для смазки месте. Подвод смазки к подшипникам малых головок шатуна осуществляется по системе отверстий, выполненных в теле шатуна. Изготовление таких смазочных отверстий малого диаметра и большой длинны, проходящих насквозь через тело шатуна достаточно дорогая и технологически сложная операция, требующая больших трудозатрат и сложного оборудования. С целью упрощения шатунной конструкции предлагается применить в качестве материала втулки малой шейки шатуна порошковый антифрикционный самосмазывающийся материала, удовлетворяющий условиям работы рассматриваемого узла. Подберем материал для изготовления самосмазывающегося подшипника.

Материалы и методы. Для подшипников, работающих в условиях граничной смазки, при недостатке или полном ее отсутствии, применяют самосмазывающиеся порошковые бронзографиты и железографиты, полученные прессованием и спеканием смеси порошков необходимого состава. Их особенностями являются пористость (объем пор до 20%) и способность впитывать масло, что позволяет работать в условиях ограничения или даже без подачи смазки. Подшипники из этих материалов пропитывают в вакуумных установках индустриальным маслом при 100–120ºС. Этого запаса масла оказывается достаточным на несколько месяцев работы подшипника без дополнительной смазки [1]. Данный период работы соответствует периоду текущего ремонта насоса, составляющему 1000 часов, при котором осуществляется проверка и замена подшипника.

Наиболее высокими прочностными качествами обладают железографиты, представляющие собой смесь 87–98% железа с 1–3 % графита и другими компонентами, выполняющими роль твердой смазки.

Согласно ГОСТ 26 802–86, условиям работы рассматриваемого узла трения наиболее отвечает материал ПА-ЖГр3Цс [3], содержащий 2,2–3,2 % углерода, 0,4–1,1 % серы, до 2,7 % цинка (компоненты сера и цинк вводятся в виде сульфида металла). Пористость материала 10–20%.

Между тем хорошо известно, что новые материалы с оригинальными свойствами требуют для своего применения создание таких конструкций, которые бы позволили бы наиболее полно использовать эти свойства.

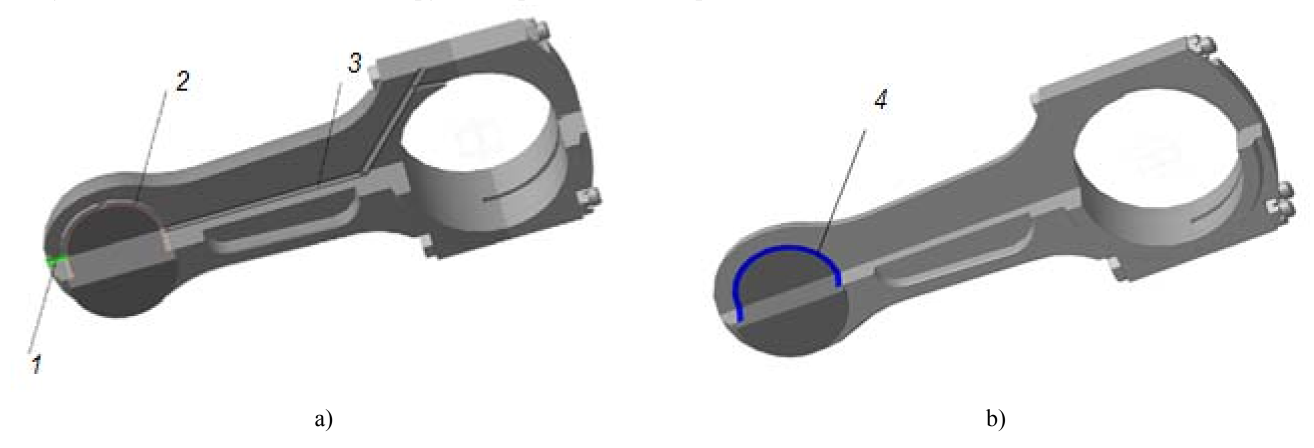
Один из параметров традиционного подшипника скольжения — зазор между втулкой и валом, который обеспечивает подвод смазки к поверхностям трения, легкость сборки, а иногда создание гидродинамического масляного клина. С другой стороны, наличие зазора ухудшает теплоотвод при граничном трении, способствует попаданию в зону трения различных загрязнений, и, как следствие, быстрому износу трущихся деталей. Увеличение зазора из-за износа приводит к снижению точности машины или механизма, возникновению вибраций и других нежелательных явлений [4].

Применение в качестве вкладышей подшипников материалов, не нуждающихся в дополнительной смазке, позволяет при конструировании узла в идеальном случае трения отказаться от обязательного зазора между трущимися деталями, а на практике значительно его минимизировать. «Беззазорные» подшипники одновременно имеют свойство уплотнений, предохраняющих поверхности трения от загрязнений. Плотное прилегание втулки к валу по всей поверхности улучшает теплоотвод, способствует равномерному распределению нагрузки по поверхности трения. При этом трение в подшипниковом узле снижается [4].

В используемой в настоящее время конструкции подшипникового узла используются следующие посадки: для наружного диаметра подшипника скольжения посадка с натягом F6/s7 (подшипник-шатун), для внутреннего E8/h6 (палец-подшипник).

Подберем посадки для изменяемой конструкции узла. Соединение втулки подшипника с шатуном по посадке с натягом удовлетворяет разрабатываемой конструкции, т.к. в случае плотного соединения втулки с шатуном, головка шатуна одновременно будет являться бандажом для порошковой втулки и увеличивать ее нагрузочную способность. Фиксация втулки от проворачивания необязательна в конструкции с самосмазывающимся подшипником т.к. проворот втулки будет компенсировать ее износ [5]. Соединение втулки с пальцем должно быть наиболее плотным для обеспечения минимального зазора. Изменим «легкоходовую» посадку E/h на «ходовую» посадку F/h, уменьшив тем самым зазор приблизительно в два раза [6]. При этом допуск на изготовление пальца оставим без изменения. Изготовление деталей методами порошковой металлургии позволяет получить достаточно низкие значения шероховатости поверхности, обеспечиваемой формообразующим инструментом. В этой связи допуск на изготовление внутреннего диаметра втулки подшипника выберем F7. Такой допуск может быть получен при изготовлении порошкового подшипника применением операции калибрования внутренней поверхности втулки после ее пропитки маслом. Таким образом подберем посадку F7/h6, обеспечивающую его работоспособность согласно указанным рекомендациям.

Результаты исследования. Использование в малой головке шатуна самосмазывающегося подшипника взамен применяемого в настоящее время (втулка 8, рис.1) позволит значительно упростить конструкцию шатуна. Модель шатуна до и после изменения конструкции представлена на рис. 2.



a) b)

Рис. 2. Модель шатуна: a) до изменения конструкции: 1 — фиксирующий винт, 2 — втулка с бронзовой заливкой, 3 — канавки для смазки; b) после изменения конструкции: 4 — втулка из порошкового антифрикционного материала

Fig. 2. Connecting-rod model: a) pending design changes: 1 - dog screw 2 – bush bearing with bronze casting, 3 – oil grooves; b) after design changing: 4 - bush bearing from powder antifriction material

Особенностью работы рассматриваемого подшипникового узла является достаточно высокие нагрузки до 516 кН при скоростях скольжения до 1 м/с [7]. Усилие F, приводящее в движение крейцкопф, и жестко связанный с ним плунжер насоса, совершающие возвратно-поступательное прямолинейное движение, передается от верхней головки шатуна, в которой запрессована втулка подшипника скольжения, и палец, закрепленный непосредственно в теле крейцкопфа. Условное удельное давление $p=F_{max}/dl \leq [p]$ составляет 45,28 МПа. Для материала, употребляемого в настоящее время в качестве подшипника скольжения головки шатуна, используется стальная труба с заливкой из бронзы БрО10Ф1, работающая в условиях полужидкостной смазки. Максимально допустимое значение *[p]* составляет 25 Мпа [8]. Подшипники, изготовленные из сульфидированного железографитового материала, предназначены для работы в тяжелых условиях нагружения и выдерживают допустимые значения показателя *[pv]* до 40 МПа [9].

Конструкция самой втулки, с учетом особенностей формования порошковых материалов [10], может быть измена следующим образом (рис. 3).

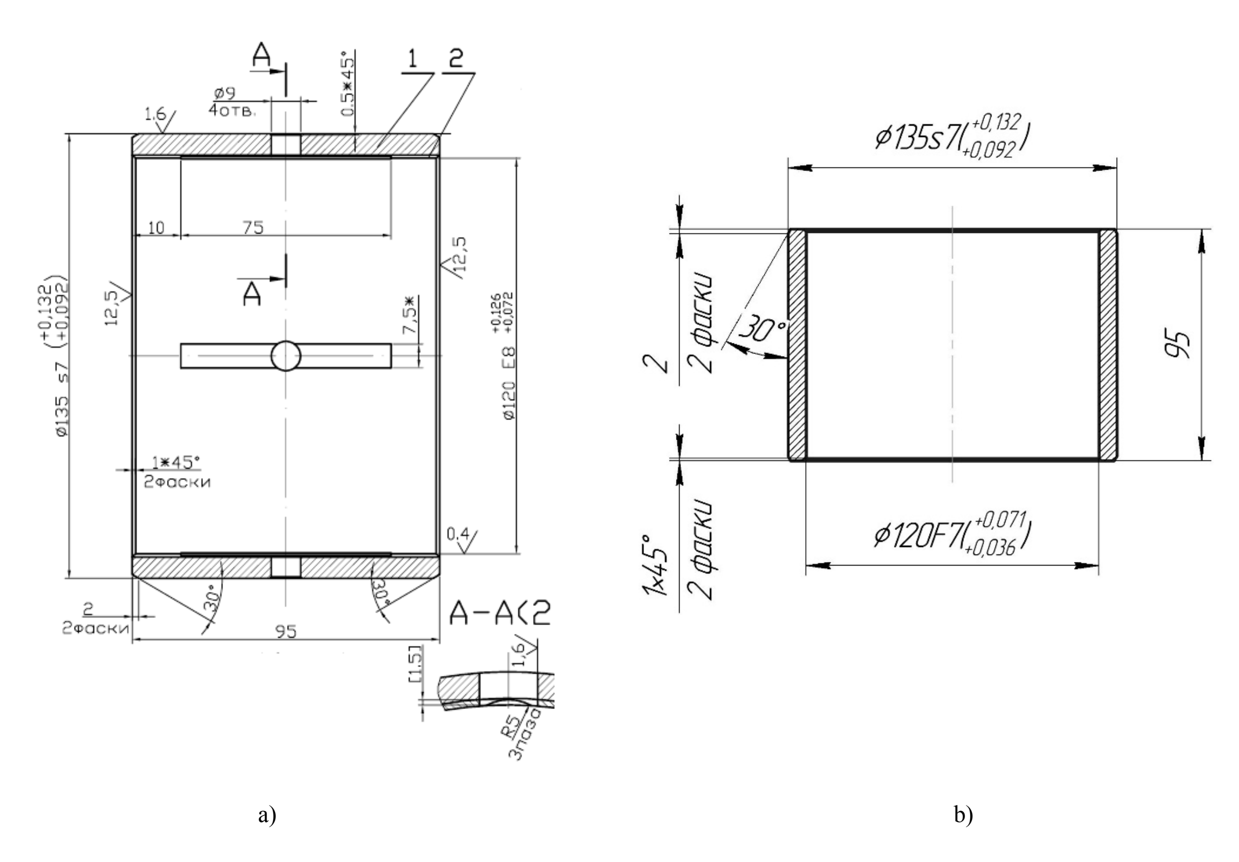


Рис. 3. Изменение конструкции втулки
а — втулка до изменения конструкции, b — втулка после изменения конструкции.

Fig. 3. Bush bearing design change
a - bush bearing before design change, b - bush bearing after design change

Заключение. Проанализировав возможность изменения конструкции узла трения малой головки шатуна плунжерного насоса высокого давления, можно сделать вывод о целесообразности применения втулки из порошкового спеченного антифрикционного материала ПА-ЖГр3Цс (ГОСТ 26 802–86) в качестве подшипника скольжения. Применение такого подшипника с эффектом самосмазывания позволит значительно упростить конструкцию шатунного узла.

Библиографический список

1. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение/ Р. А. Андриевский. — Москва : Металлургия, 1991 — 205с.

2. Киреев, С.О. Трёхплунжерные насосы высокого давления ЗАО «Траст-Инжиниринг»/ С. О. Киреев, В. П. Попов // Топливный рынок. — 2010. — июнь — С. 8–11.

3. ГОСТ 26 802–86. Материалы антифрикционные на основе железа. Марки. /Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов 1986. — 16 с.

4. Авдеев, Д. Т. Материалы и конструкции самосмазывающихся подшипников скольжения / Д. Т. Авдеев, Н. В. Бабец, С. С. Мусиенко. — Новочеркасск : Новочерк. гос. техн. ун-т., 1993 — 112с.

5. Васильев, Б. Н. Основы проектирования и расчета узлов трения: учеб. пособие / Б. Н. Васильев, М. А Васильев. — Новочеркасск : ЮРГПУ(НПИ), 2013. — 126с.

6. Анухин, В. И. Допуски и посадки. Выбор и расчет, указание на чертежах : учеб. пособие / В. И. Анухин. — 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТУ, 2001. — 219 с.

7. Анализ условий работы узлов трения скольжения приводной части плунжерных насосов высокого давления сервиса нефтегазовых скважин / С. О. Киреев. [и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. — 2016. — №5 — С. 25 – 30.

8. Справочник по триботехнике. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. — Москва : Машиностроение, 1990. — 416 с.

9. Федорченко, И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. — Киев : Наук. Думка, 1980. — 404 с.

10. Перельман, В. Е. Формование порошковых материалов / В. Е. Перельман. — Москва : Металлургия, 1979. — 232 с.

References

1. Andrievskiy, R.A. Poroshkovoe materialovedenie. [Powder Hylology.] Moscow: Metallurgiya, 1991, 205p. (in Russian).

2. Kireev, S.O., Popov, V.P. Trekhplunzhernye nasosy vysokogo davleniya ZAO «Trast-Inzhiniring». [Triple-throw high-lift pumps of “Trust-Engineering” JSC.] Toplivnyy rynok, 2010, June, pp. 8–11 (in Russian).

3. GOST 26802–86. Materialy antifriktsionnye na osnove zheleza. Marki. [State standard 26802–86. Iron-based powder antifriction materials.Types.] USSR State Standards Committee. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1986, 16 p. (in Russian).

4. Avdeev, D.T., Babets, N.V., Musienko, S.S. Materialy i konstruktsii samosmazyvayushchikhsya podshipnikov skol'zheniya. [Materials and designs of self-lubricating friction bearings.] Novocherkassk: Novocherkassk State Technical University, 1993, 112 p. (in Russian).

5. Vasilyev, B.N., Vasilyev, M.A. Osnovy proektirovaniya i rascheta uzlov treniya. [Fundamentals of design and calculation of friction units.] Novocherkassk: YuRGPU (NPI), 2013, 126 p. (in Russian).

6. Anukhin, V.I. Dopuski i posadki. Vybor i raschet, ukazanie na chertezhakh. [Adjustments and allowances. Selection and calculation, reference to the drawings.] 2nd revised and enlarged ed. St.Petersburg : SPbGTU Publ. House, 2001, 219 p. (in Russian).

7. Kireev, S.O. et al. Analiz usloviy raboty uzlov treniya skol'zheniya privodnoy chasti plunzhernykh nasosov vysokogo davleniya servisa neftegazovykh skvazhin. [Analysis of the functional conditions in sliding friction units of the power end of high pressure plunger pumps for service of oil and gas wells.] Chemical and Petroleum Engineering, 2016, no. 5, pp. 25–30 (in Russian).

8. Khebda, M., Chichinadze, A.V., eds. Spravochnik po tribotekhnike. T. 2. Smazochnye materialy, tekhnika smazki, opory skol'zheniya i kacheniya. [Triboengineering reference. Vol. 2. Lubricants, greasing technique, sliding and rolling bearings.] Moscow: Mashinostroenie, 1990, 416 p. (in Russian).

9. Fedorchenko, I.M., Pugina, L.I. Kompozitsionnye spechennye antifriktsionnye materialy. [Composite sintered antifriction materials.] Kiev: Nauk. Dumka, 1980, 404 p. (in Russian).

10. Perelman, V.E. Formovanie poroshkovykh materialov. [Powdered materials molding.] Moscow: Metallurgiya, 1979, 232 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 15.08.2016
Сдана в редакцию 15.08.2016
Запланирована в номер 11.01.2017

Received 15.08.2016
Submitted 15.08.2016
Scheduled in the issue 11.01.2017

Об авторах:

Корчагина Марина Валерьевна, доцент кафедры «Машины и оборудование НГК» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7092-7176, ms.korchaginamv@mail.ru

Authors:

Korchagina, Marina V., associate professor of the Agro-industrial Complex Machines and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7092-7176, ms.korchaginamv@mail.ru

Киреев Сергей Олегович, заведующий кафедрой «Машины и оборудование НГК» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9352-3852, kireevso@yandex.ru

Kireev, Sergey O., head of the Agro-industrial Complex Machines and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9352-3852, kireevso@yandex.ru

Никишенко Сергей Леонидович, доцент кафедры «Машины и оборудование НГК» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5670-2632, nikish1947@mail.ru

Nikishenko, Sergey L., associate Professor of Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5670-2632, nikish1947@mail.ru

Кузин Алексей Дмитриевич, магистрант Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2738-5257, Kuzin_lesha@mail.ru

Kuzin, Alexey D., Master’s Degree student, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2738-5257, Kuzin_lesha@mail.ru